

# Swiss PV Circle

## Lot de travaux 2 - modèle d'entreprise

### Aspects économiques et écologiques de la réutilisation des installations photovoltaïques

|                            |  |
|----------------------------|--|
| Numéro du lot de travaux   | AP2  |
| Titre du paquet de travail | Modèle d'entreprise  |
| Lead du paquet de travail  | SENS eRecycling  |
| Numéro de livrable         | AP2.1  |
| Nom du livrable            | Aspects économiques et écologiques de la réutilisation des installations photovoltaïques |
| Statut                     | Rapport final  |
| Auteur                     | Michael Gasser   |
| Niveau de diffusion        | Public   |
| Date de publication        | 16.06.2025   |

## Contenu

|   |    |
|---|----|
| Résumé exécutif   | 2  |
| 1. Introduction   | 3  |
| 2. Rentabilité des installations réutilisées  | 4  |
| 2.1 Situation de départ   | 4  |
| 2.2 Réutilisation des modules : coûts de retraitement   | 5  |
| 2.3 Réutilisation des modules : influence des méthodes de test                                  | 7  |
| 2.4 Réutilisation d'installations entières  | 8  |
| 2.5 Influence de la rémunération unique   | 8  |
| 3. Écologie des installations réutilisées   | 9  |
| 3.1 Situation de départ   | 9  |
| 3.2 Influence du contrôle des modules photovoltaïques   | 10 |
| 3.3 Réutilisation sur des surfaces sans restrictions (scénario 1a)                              | 10 |
| 3.4 Réutilisation sur des surfaces à durée de vie limitée (scénario 1b)                         | 11 |
| 3.5 Réutilisation sur des surfaces ne permettant pas la création d'un nouveau site (scénario 2) | 11 |
| 4. Conclusion   | 12 |
| Annexe  | 14 |
| Littérature   | 15 |

## Résumé exécutif

La réutilisation de modules et d'autres composants d'installations photovoltaïques qui sont démontés à un stade précoce présente un potentiel économique et écologique important. Le projet Swiss PV Circle a pour objectif de promouvoir la réutilisation des installations photovoltaïques et a étudié dans quels cas une réutilisation peut être judicieuse sur le plan économique et écologique.

Les résultats du projet montrent qu'il existe des circonstances dans lesquelles la réutilisation peut s'avérer judicieuse, tant sur le plan économique qu'écologique. D'un point de vue environnemental, la réutilisation est pertinente dans de nombreuses conditions et dépend notamment de la durée de fonctionnement d'une installation réutilisée par rapport à une installation neuve.

D'un point de vue économique, la réutilisation est plus difficile. Le coût des tests des modules PV usagés constitue un obstacle majeur. Aujourd'hui, les modules doivent être testés et recertifiés individuellement. Le développement et l'acceptation de méthodes de test alternatives à moindre coût permettraient de réaliser d'importantes économies dans le cadre de la réutilisation, ce qui renforcerait ou rendrait possible les avantages économiques de la réutilisation.

D'un point de vue économique et écologique, la réutilisation est particulièrement pertinente si non seulement les modules PV, mais aussi d'autres composants (par exemple les onduleurs et la sous-structure) sont réutilisés. Dans la pratique, la réutilisation de ces composants s'avère difficile, car ils sont spécifiquement adaptés au site et à l'installation. Afin d'encourager la réutilisation et de prendre en compte autant que possible tous les composants, le projet Swiss PV Circle a élaboré un formulaire regroupant les informations nécessaires à l'évaluation de la possibilité de réutilisation des installations (voir livrable 2.3). En outre, un guide de réutilisation a été élaboré à l'intention des entreprises d'installation (voir livrable 2.2).

# 1. Introduction

La construction d'une installation photovoltaïque entraîne des coûts financiers et écologiques. Les composants doivent être fabriqués et installés, ce qui a un impact à la fois financier et écologique.

Pendant l'exploitation d'une installation, de l'électricité est produite, ce qui a une valeur économique et écologique. D'un point de vue écologique et économique, il est judicieux d'utiliser une installation existante le plus longtemps possible. De nos jours, les écobilans et les calculs de rentabilité partent du principe que les installations PV ont une durée de vie d'environ 25 à 30 ans.<sup>1</sup>

En raison des développements technologiques, l'efficacité des modules photovoltaïques augmente. Pour cette raison, il peut être économiquement intéressant de démonter des installations existantes et fonctionnelles avant leur fin de vie technique lorsque les surfaces sont limitées. De même, des circonstances extérieures peuvent provoquer le démantèlement anticipé d'installations et de composants PV en état de marche (p. ex. rénovation de toitures, surélévation, dommages dus à la grêle). Aujourd'hui, la plupart de ces installations et composants ne sont pas réutilisés, mais envoyés au recyclage via la solution de branche de SENS eRecycling et Swissolar.

Les installations et les composants photovoltaïques déconstruits pourraient en principe être réutilisés et représentent ainsi un potentiel pour l'économie circulaire et le développement de la production d'électricité renouvelable.

La Figure 1 montre, à titre d'exemple, comment les coûts et avantages économiques et écologiques globaux des installations photovoltaïques évoluent au fil du temps et quels peuvent être les effets d'un remplacement précoce ou d'une réutilisation. Selon l'approche d'évaluation utilisée - qu'il s'agisse d'une analyse coûts-bénéfices économique ou écologique - et en fonction de la méthodologie choisie pour quantifier les dépenses écologiques (par exemple sous forme d'équivalents CO<sub>2</sub> ou de points de charge environnementale [UBP]), les résultats, notamment la hauteur des barres représentées, peuvent varier de manière significative.

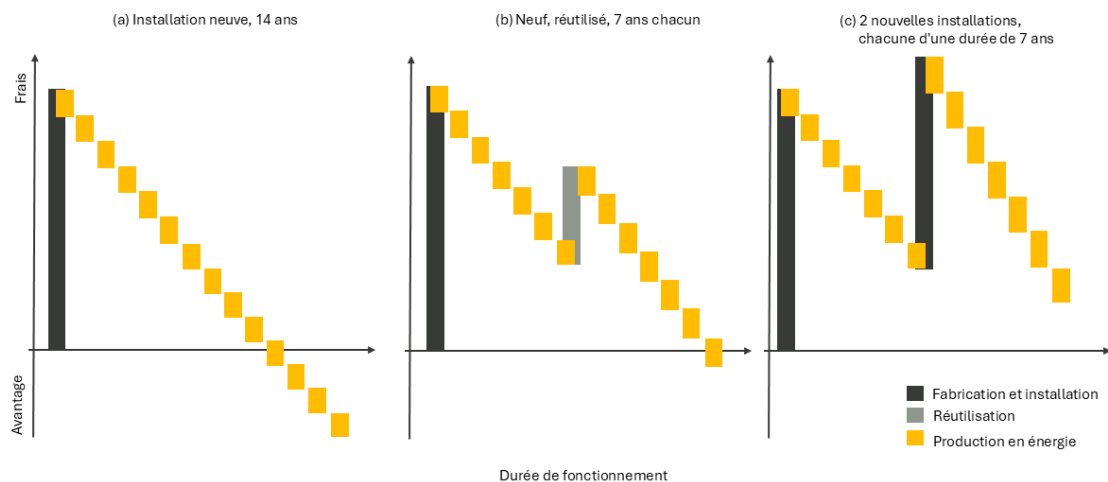


Figure 1 : Évolution des coûts et des bénéfices de la fabrication et de l'utilisation d'une installation photovoltaïque sur plusieurs années d'exploitation.

<sup>1</sup> Frischknecht et al., "Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020."

Un exemple de calcul avec les chiffres de l'étude d'observation des prix de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) montre quel pourrait être le potentiel économique de la réutilisation.<sup>2</sup> En 2023, la part des modules PV dans les coûts totaux d'une installation se situait entre 14% (installations 2-10kWp) et 36,9% (300-1000kWp). Pour les installations de 10-30kWp, qui sont les plus fréquentes, le coût des modules est d'environ 20%. Si les modules issus de la réutilisation pouvaient être achetés gratuitement, les coûts seraient réduits en conséquence de ce pourcentage. Des calculs similaires peuvent également être effectués pour l'aspect écologique.

Dans le cadre du projet Swiss PV Circle, des recherches ont été menées pour déterminer les conditions dans lesquelles la réutilisation de composants ou d'éléments de construction en état de marche est judicieuse d'un point de vue écologique ou économique. L'objectif de ces recherches était d'identifier des domaines d'application judicieux pour la réutilisation des installations PV. Pour l'étude, les installations PV ont été divisées de manière simplifiée en trois composants : les modules PV, l'électronique et l'onduleur ainsi que la sous-construction. Une nouvelle installation fait ici référence à une installation dont tous les composants sont neufs. Une installation réutilisée fait référence à une installation dont au moins les modules PV ont déjà été utilisés auparavant. Toutefois, les installations réutilisées peuvent également utiliser des composants réutilisés supplémentaires. Afin d'analyser l'impact de différents niveaux de réutilisation, différents scénarios ont été développés et étudiés pour évaluer les implications économiques et environnementales de ces approches.

Les calculs ont toujours été basés sur des installations de même puissance nominale. L'effet d'une production d'énergie plus élevée d'une nouvelle installation avec un rendement plus élevé par rapport à une installation réutilisée dans le cas d'une surface d'installation limitée n'a donc pas été pris en compte, c'est-à-dire que l'on a supposé que les surfaces disponibles pour l'installation PV ne limitaient pas la réutilisation. En outre, tous les calculs se rapportent à des installations sur toiture.

## 2. Rentabilité des installations réutilisées

### 2.1 Situation de départ

Afin de prendre en compte la rentabilité des installations réutilisées, il convient de considérer à la fois les coûts de retraitement des composants usagés et les coûts d'installation. Si les composants reconditionnés peuvent être achetés à un coût inférieur à celui de composants neufs comparables, il est possible, mais pas obligatoire, qu'une installation réutilisée soit rentable. Pour une évaluation complète, il faut en outre tenir compte des différences de durée de vie, de production d'énergie et des éventuelles différences de coûts d'installation (mesures de sécurité, main-d'œuvre, planification du projet). Dans le projet Swiss PV Circle, les coûts de préparation des modules photovoltaïques ont notamment été examinés sous l'angle de la rentabilité, car on peut s'attendre à ce que les coûts d'installation des installations réutilisées soient comparables à ceux des installations neuves.

---

<sup>2</sup> Bloch and Sauter, "Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2023."

## 2.2 Réutilisation des modules : coût de la préparation

Le traitement des composants PV usagés comprend le démontage, le contrôle, la mise à disposition ainsi que les frais de transport et de stockage qui y sont liés. Alors que les coûts de démontage et de mise à disposition peuvent être estimés de manière relativement fiable sur la base des valeurs empiriques habituelles du secteur, le contrôle des composants usagés représente un processus spécifique dont les coûts doivent être calculés individuellement. Les tests de modules photovoltaïques sont particulièrement pertinents à cet égard, car les défauts de ces composants peuvent avoir des conséquences importantes en termes de sécurité et de coûts.

Il existe différentes méthodes techniques permettant de vérifier la sécurité, la longévité et les performances de production des modules photovoltaïques. Elles ont été développées à l'origine pour évaluer les dommages subis par les installations (grêle, incendie), la mise en service des installations ou à partir du contrôle de qualité lors de la fabrication. Ces méthodes permettent en principe de se faire une bonne idée de l'état d'un module. Dans le cadre du projet Swiss PV Circle, nous avons élaboré un guide pour la réutilisation des modules PV de seconde main (voir le livrable 2.2).

Les méthodes disponibles ne permettent de se prononcer complètement sur l'état d'un module PV d'occasion que si chaque module est testé individuellement. Les entretiens menés avec des acheteurs potentiels dans le cadre du Swiss PV Circle montrent que les modules déjà utilisés sont particulièrement bien acceptés par les propriétaires ou les acheteurs lorsque les tests de chaque module sont comparables à ceux des modules neufs. Cela est certainement dû au fait que la réutilisation des composants est un thème plutôt nouveau et que les pannes précoces peuvent avoir des conséquences financières importantes. Un atelier organisé dans le cadre du Swiss PV Circle avec des parties prenantes internationales montre que la tendance qui s'impose actuellement, même au niveau international, est que chaque module individuel doit être entièrement testé pour être réutilisé (voir livrable 5.1).

Compte tenu de cette situation, le projet Swiss PV Circle s'est concentré sur l'évaluation des coûts des tests de modules individuels. Deux essais pilotes ont été soutenus et réalisés pour le test de modules PV usagés, afin de pouvoir saisir et modéliser les conséquences financières du test. Le premier pilote a été réalisé en collaboration avec les Services Industriels de Genève (SIG)<sup>3</sup> et la commune de Meyrin<sup>4</sup>, le second avec l'association RE-WIN<sup>5</sup>. Dans le premier pilote, environ 270 modules ont été testés avec une installation de test mobile pour modules PV de la Haute école spécialisée de Suisse orientale (OST)<sup>6</sup>, dans le deuxième pilote environ 20 modules ont été testés avec des appareils de test manuels de l'entreprise Solarenergie Küng GmbH<sup>7</sup> ainsi qu'avec un prototype d'appareil de mesure des courbes caractéristiques Plug & Play de la Haute école spécialisée bernoise (BFH)<sup>8</sup>.

Le coût du test des modules se situait entre 30-50 CHF et 50-90 CHF par module, selon la méthode de test utilisée (tableau 1). La location d'une installation de test mobile est plus avantageuse que l'utilisation d'appareils de test manuels à partir d'un lot d'environ 100 modules, car le débit obtenu est plus élevé. Ces

---

<sup>3</sup> <https://ww2.sig-ge.ch/>."

<sup>4</sup> <https://meyrin.ch/fr/>."

<sup>5</sup> <https://re-win.ch/>."

<sup>6</sup> [https://www.ost.ch/en/research-and-consulting-services/technology/renewable-energies-and-environmental-engineering/spf-institute-for-solar-technology/testing/mobile-pv-test-laboratory.](https://www.ost.ch/en/research-and-consulting-services/technology/renewable-energies-and-environmental-engineering/spf-institute-for-solar-technology/testing/mobile-pv-test-laboratory/)"

<sup>7</sup> <https://www.solarenergie-kueng.ch/>."

<sup>8</sup> Jäggi and Bucher, "Plug & Play-Kennlinienmessgerät für Photovoltaik-Module."

coûts sont applicables à la structure quantitative qui prévaut aujourd'hui sur le marché (petites quantités annuelles, les modules doivent être testés sur quelques installations dans le cadre de projets individuels). Les coûts relevés tiennent compte de la location des appareils ainsi que du personnel nécessaire pour les tests, mais pas des autres coûts tels que le stockage et le transport, qui ont été supportés par les propriétaires des installations.

Si la demande de modules d'occasion augmentait et que la structure des volumes changeait, un modèle commercial alternatif basé sur la production pourrait être financièrement plus efficace. Dans ce modèle, une entreprise réalise des investissements spécifiques dans une installation de test et l'exploite à un taux d'utilisation élevé afin de tester les modules photovoltaïques au meilleur coût possible. Le volume pour un tel modèle d'affaires serait en principe disponible. La quantité de modules PV récupérés par SENS eRecycling s'élevait en 2022 à près de 50 000 unités, avec une tendance à la hausse (voir livrable 3.1). Dans le cadre d'un tel modèle d'affaires, une entreprise devrait se procurer de manière autonome la quantité et la qualité nécessaires de modules PV déconstruits, les tester dans sa propre infrastructure, les stocker le cas échéant et les commercialiser.

Tableau1 : Aperçu des coûts de test des modules PV relevés dans le cadre du projet Swiss PV Circle

| Structure quantitative        | Art  | CHF / module testé <sup>1</sup>                                     | centimes / Wp <sup>2</sup> |
|-------------------------------|--|---|----------------------------|
| Petites quantités             | Manuellement avec des testeurs manuels   | 50-90   | 22 - 40                    |
| Projets individuels           | Location d'une installation de test mobile par utilisation (à partir de 100 modules / lot) | 30-50   | 13 - 22                    |
| Débit continu                 | Installation de test mobile sur place  | 45 (pour 1'000 M/J) <sup>3</sup><br>39 (pour 3'000 M/J)             | 17 - 20                    |
| Infrastructure de test dédiée | Centre de test Suisse (installation fixe) (à partir de 5'000 modules / an)                 | 43 (pour 3'000 M/J)<br>28 (pour 10'000 M/J)<br>25 (pour 30'000 M/J) | 11 - 19                    |

<sup>1</sup>Sans tenir compte des modules qui ne réussissent pas les tests.

<sup>2</sup>avec une moyenne de 250 Wp / module et 90% des modules qui réussissent les tests.

<sup>3</sup>M/J : modules / année

Les calculs de coûts complets de Swiss PV Circle montrent que ce modèle commercial devient plus rentable à partir d'un volume de test de 3'000 à 5'000 modules par an, malgré des coûts supplémentaires (surfaces, administration, transport, stockage, amortissement, intérêts, etc.) et que des coûts de test de l'ordre de 25 à 45 CHF peuvent être atteints, en fonction de la quantité annuelle.

Les coûts des tests par module sont similaires, indépendamment de la taille et du rendement du module, car chaque module doit toujours être testé individuellement. Si les coûts des tests sont calculés par rapport à la puissance nominale, les coûts des modules plus anciens, avec une surface plus petite et un rendement plus faible, sont bien plus élevés que ceux des modules plus récents. Avec des coûts de test par module de 50 CHF, un module plus ancien d'une puissance nominale de 250 Wp aurait des coûts de test d'environ 0,2 CHF/Wp, tandis qu'un module plus récent d'une puissance nominale de 350 Wp aurait des coûts de test d'environ 0,14 CHF/Wp. Ces coûts sont légèrement inférieurs ou similaires aux prix du marché des modules neufs traditionnels (situation en janvier 2025), mais ne tiennent pas compte des coûts potentiels liés à la

planification et à l'étude de projet ou à la sous-construction (anciens systèmes de fixation, surface supplémentaire), ni de la durée d'exploitation potentiellement limitée.

Les demandes émanant du marché pendant la durée du projet indiquent que, pour l'instant, ce sont surtout les installations avec des modules d'une puissance inférieure à 250 Wc qui sont démantelées. En supposant que les modules destinés à être réutilisés doivent tous être testés individuellement, les coûts de test relevés dans le cadre du projet montrent que la réutilisation de tels modules dans la structure quantitative actuelle n'est guère intéressante sur le plan économique par rapport aux modules neufs. Ceci est particulièrement vrai si l'on considère que les suppléments de risque et les marges ne sont pas pris en compte. Les modules d'une puissance plus élevée (>350Wp), disponibles en grande quantité et de construction identique, comme par exemple dans une installation industrielle, sont plus intéressants du point de vue économique.

En cas de changement de la situation du marché, avec des prix plus élevés pour les modules neufs et une disponibilité accrue des modules réutilisables (voir livrable 3), la réutilisation pourrait devenir financièrement plus intéressante.

### **2.3 Réutilisation des modules : influence des méthodes de test**

Les tests de modules individuels utilisés aujourd'hui pour la réutilisation sont coûteux, entraînent des efforts importants et n'évoluent que de manière limitée avec l'augmentation du nombre de pièces. Si les exigences relatives aux tests à effectuer pouvaient être réduites tout en collectant des informations fiables et solides sur l'état des modules et des installations photovoltaïques, cela aurait un impact significatif sur la rentabilité de la réutilisation des modules.

Dans un scénario optimiste avec les structures quantitatives actuelles et les tests de modules individuels, une réduction des coûts d'environ 20% par rapport aux modules neufs est possible. En tenant compte de la part des coûts des modules PV dans les coûts totaux de l'installation, cela entraînerait des réductions de 3% pour les installations de 10 à 30 kWp et de 7% pour les installations d'une puissance de 300 à 1'000 kWp (calculé sur la base de SuisseEnergie, 2024). Ces économies sont plutôt faibles compte tenu des risques et des dépenses supplémentaires potentielles (maintenance des installations). Avec des méthodes de test alternatives, qui pourraient par exemple permettre une économie de 80% par rapport à des modules neufs, les coûts totaux des installations seraient réduits de 11 à 29%.

L'essai pilote réalisé en collaboration avec SIG montre les limites des méthodes de contrôle technique appliquées. Au cours de l'essai, 273 modules au total, âgés de 20 ans, ont été testés afin de déterminer s'ils étaient aptes à être réutilisés. A cette occasion, 49 (18%) ont été exclus de la réutilisation en raison de défauts visibles avec un simple contrôle visuel (décollement de backsheets, oxydation, câbles, connecteurs ou diodes défectueux, bris de verre, etc.) Seuls 8 autres modules (3%) ont été exclus de la réutilisation en raison d'un échec aux contrôles techniques.

Ces chiffres montrent l'importance de soumettre les modules à un examen visuel préalable avant un contrôle technique, afin de réduire les coûts d'un contrôle technique. De même, ils montrent que les modules d'installations qui ont fonctionné sans problèmes notables au cours de leur première vie et qui ne présentent pas de défauts visibles peuvent, pour la plupart, être utilisés au cours d'une deuxième vie. Il n'est pas possible de garantir la durée d'une deuxième vie, même avec tous les tests de modules individuels. Les méthodes de contrôle technique peuvent détecter des défauts isolés, mais il convient de se demander si un contrôle coûteux de chaque module est pertinent ou si des tests de l'ensemble de l'installation ou du string ne sont

pas plus pertinents. Des mesures basées sur les chaînes et les installations, y compris les données de production historiques et les tests de modules individuels, couplés à la preuve de sécurité pour la mise en service d'une installation réutilisée, pourraient donc en principe suffire pour obtenir suffisamment d'informations pour l'évaluation technique d'une possibilité de réutilisation. Les tests de modules individuels pourraient être réduits à une sélection de quelques modules (chaînes problématiques, sélection aléatoire).

#### **2.4 Réutilisation d'installations entières**

Si d'autres composants de l'installation peuvent être réutilisés, les économies de coûts potentielles augmentent. Dans le cas idéal, on peut envisager le déplacement d'une installation existante, y compris tous les composants, sur une nouvelle surface, sans aucun coût de test. Dans ce cas, seuls les coûts de main-d'œuvre et de sécurité sont à prendre en compte, ce qui représente entre 28% (300-1000 kWp) et 37% (2-10 kWp) du coût total de l'installation.<sup>9</sup> Dans un tel scénario, il serait donc possible d'économiser au maximum 60 à 70% des coûts d'installation.

Si l'on suppose une augmentation de la charge de travail ou que certains composants doivent être remplacés, l'avantage en termes de coûts se réduit rapidement. D'un point de vue financier, la réutilisation des onduleurs et des composants électroniques semble plus intéressante que celle des systèmes de montage, même si ces derniers peuvent être plus faciles à mettre en œuvre dans la pratique. Un système de montage représente environ 10 à 15% des coûts d'une installation, tandis que les onduleurs et les composants électroniques contribuent ensemble à hauteur de 15 à 27%.<sup>10</sup>

#### **2.5 Influence de la rémunération unique**

Avec une rétribution unique (RU), les exploitants d'installations PV reçoivent une contribution unique à l'investissement. Les rétributions uniques pour les installations PV sont accordées sur la base de différents facteurs d'influence, y compris l'angle d'inclinaison et la puissance de l'installation, et sur la base de coûts moyens.

Etant donné que les économies potentielles liées à la réutilisation ne sont pas prises en compte dans ce relevé des coûts et que la rémunération est forfaitaire, la rétribution unique avec un taux de réutilisation élevé peut avoir un impact plus important en termes de pourcentage. Une installation qui, avant la prise en compte de la RIE, peut être réalisée avec une économie de coûts de 30% par rapport à une nouvelle installation grâce à la réutilisation, a un avantage de prix de 40% par rapport à une nouvelle installation après la prise en compte de la RIE (tableau 2). Ces calculs supposent qu'une installation de même puissance est construite sur le même site, bien qu'une installation avec des modules réutilisés nécessite une surface plus importante (optimisation de l'autoconsommation, c'est-à-dire contexte maison individuelle).

Si une installation réutilisée moins puissante est comparée à une nouvelle installation plus puissante (utilisation de la surface disponible, puissance plus faible des modules réutilisés), cet effet ne se produit pas ou de manière limitée, en fonction des hypothèses.

---

<sup>9</sup> Bloch and Sauter, "Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2023."

<sup>10</sup> Bloch and Sauter.

Tableau2 : Influence de l'EIV sur le coût total des installations PV avec et sans EIV

| Annexe <sup>1</sup>                | Coûts d'investissement ex. EIV <sup>2</sup><br>CHF | EIV <sup>3</sup><br>CHF | Coûts de placement, y compris EIV<br>CHF | Coûts nets spécifiques, CHF/kWp |
|------------------------------------|--|-------------------------|--|---------------------------------|
| 20 kWp Nouveau                     | 45'000   | 8'000 (18%)             | 37'000                                   | 1'850                           |
| 20 kWp, réutilisation <sup>4</sup> | 30'000   | 8'000 (26%)             | 22'000                                   | 1'110                           |
| 20 kWp, réutilisation <sup>5</sup> | 40'500   | 8'000 (20%)             | 32'500                                   | 1'625                           |
| 15 kWp, réutilisation <sup>4</sup> | 24'000   | 6'000 (25%)             | 18'000                                   | 1'200                           |
| 15 kWp, réutilisation <sup>5</sup> | 33'000   | 6'000 (18%)             | 27'000                                   | 1'800                           |

<sup>1</sup>Hypothèse : même site, installation de même puissance, avec des modules réutilisés, mais besoin de surface plus élevé

<sup>2</sup>Selon SuisseEnergie, 2024, 20kWp (45'000 CHF) et 15kWp (36'500 CHF), calculés selon les formules 2023.

<sup>3</sup>Selon le calculateur de tarif EIV de Pronovo<sup>11</sup>

<sup>4</sup>Exemple de calcul optimiste, réduction des coûts de 30% par rapport à une nouvelle installation

<sup>5</sup>Exemple de calcul réaliste, réduction des coûts de 10% par rapport à une nouvelle installation

### 3. Écologie des installations réutilisées

#### 3.1 Situation de départ

Afin d'étudier les possibilités et les limites de la réutilisation pour la durabilité des installations photovoltaïques, les scénarios suivants ont été examinés :

- **Comparaison entre la réutilisation et une nouvelle installation** : sur le site de la réutilisation, l'installation d'une nouvelle installation est également envisageable.
- **Réutilisation sur des surfaces sans limitation de la durée de vie** : la durée de vie de l'installation n'est pas limitée par le lieu d'application (c'est-à-dire qu'on peut supposer qu'une nouvelle installation atteint une durée de vie de 25 à 30 ans).
- **Réutilisation sur des surfaces à durée de vie limitée** : la durée de fonctionnement de l'installation est limitée en raison du lieu d'installation (p. ex. construction neuve de remplacement, rénovation du toit ou surélévation prévue, fort encrassement).
- **Réutilisation sur des surfaces qui ne permettent pas une nouvelle installation** : Une installation à l'état neuf n'est pas envisageable sur le site de la deuxième utilisation ou il n'est pas possible de garantir qu'une nouvelle installation verrait le jour.

Tous les calculs ont été effectués à la fois pour les émissions de CO<sub>2</sub> et pour les points de charge environnementale (UBP). Les UBP combinent un grand nombre d'impacts environnementaux selon la méthode de la rareté écologique.<sup>12</sup> Dans les UBP, les métaux technologiques contenus dans l'électronique, tels que le cuivre et l'or, ont notamment une pondération plus élevée.

<sup>11</sup> "<https://pronovo.ch/de/services/tarifrechner/>."

<sup>12</sup> OFEV, "Facteurs écologiques Suisse 2021 selon la méthode de la rareté écologique".

L'utilisation de crédits écologiques dans les analyses de cycle de vie dans le domaine de l'énergie n'est plus recommandée, car des résultats très différents sont produits avec des hypothèses et des valeurs différentes.<sup>13</sup> En conséquence, l'analyse coûts/bénéfices a été étudiée avec la question suivante : A partir de quelle durée de vie une installation réutilisée produit-elle de l'énergie qui, compte tenu des émissions liées à la mise à disposition, génère moins d'émissions qu'une nouvelle installation PV ? Les hypothèses détaillées pour les calculs se trouvent à l'annexe 1.

### 3.2 Influence du contrôle des modules photovoltaïques

Les tests de modules photovoltaïques ont un impact significatif sur l'évaluation économique, alors qu'ils sont relativement insignifiants d'un point de vue écologique. Les processus de test consomment peu d'eau pour le nettoyage des modules, ainsi que de l'énergie pour le fonctionnement des installations et des équipements de test, qui peuvent toutefois être réutilisés plusieurs fois. Il faut en outre tenir compte du transport des modules vers des installations de test fixes ou de l'utilisation d'équipements de test mobiles sur place. Les recherches menées par Mija Fossard de la Haute école d'économie et d'ingénierie du canton de Vaud (HEIG-VD) dans le cadre du projet REMCO<sup>14</sup> montrent que les coûts écologiques des tests, mesurés en UBP et en émissions de CO<sub>2</sub>, sont négligeables si les tests sont effectués sur place. Le test des modules photovoltaïques est donc toujours judicieux sur le plan écologique, même s'ils ne sont réutilisés qu'à court terme.

### 3.3 Réutilisation sur des surfaces sans restrictions (scénario 1a)

En cas de réutilisation sur des surfaces sans restrictions, l'impact du taux de réutilisation est totalement visible. La réutilisation d'une installation complète est déjà plus écologique que la construction d'une nouvelle installation à partir d'une deuxième vie d'environ 4 (CO<sub>2</sub>) et 2,5 (UBP) ans (figure 2).

Si seuls les modules sont réutilisés et que des composants neufs sont utilisés par ailleurs, une deuxième durée de vie de 10-13 (CO<sub>2</sub>) et 12,5-13,5 (UBP) ans est nécessaire. Cela dépend de la surface nécessaire aux modules pour la même puissance nominale et de la quantité correspondante de sous-structure. Si d'autres composants sont réutilisés, la durée d'exploitation nécessaire est plus faible, car l'énergie produite doit être répartie sur moins d'émissions. Ces facteurs sont décrits dans le scénario 2.

---

<sup>13</sup> Frischknecht et al., "Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020."

<sup>14</sup> "[https://www.hes-so.ch/en/recherche-innovation/research-projects/detail-projet-recherche/remco-reemploi-des-materiaux-de-construction-etat-des-lieux-sur-les-defis-logistiques.](https://www.hes-so.ch/en/recherche-innovation/research-projects/detail-projet-recherche/remco-reemploi-des-materiaux-de-construction-etat-des-lieux-sur-les-defis-logistiques)"

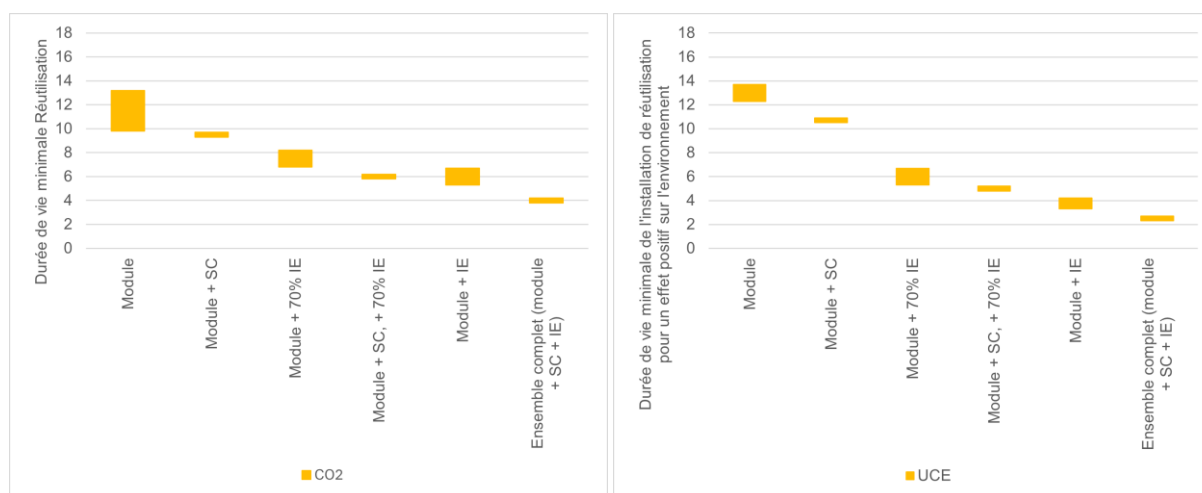


Figure 2 : Durée de fonctionnement d'une installation PV réutilisée à partir de laquelle la réutilisation est plus écologique qu'une nouvelle installation. A gauche, calculé sur la base des émissions de CO<sub>2</sub>, à droite sur la base des points de charge environnementale (UCE). Module : Réutilisation des modules PV, SC : réutilisation de la sous-construction, IE : réutilisation de l'installation électrique, y compris l'onduleur (O), 70% IE : réutilisation de 70% de l'installation électrique, y compris le WR. Les composants non mentionnés sont considérés comme neufs.

### 3.4 Réutilisation sur des surfaces à durée de vie limitée (scénario 1b)

Si la durée de vie d'une installation PV est limitée dès le départ, une nouvelle installation PV ne peut pas faire valoir son avantage d'une durée de vie élevée. De même, sur un tel site, la nouvelle installation PV est liée à des émissions ou à des charges environnementales plus élevées, car les coûts écologiques de la construction de l'installation sont indépendants de la durée de vie. Dans ce cas, la réutilisation est rentable plus tôt. Si une nouvelle installation PV est planifiée avec une durée de vie de 15 ans seulement au lieu de 30, elle présente des émissions environ deux fois plus élevées par kWh produit (mêmes coûts écologiques lors de la construction, la moitié de la production d'énergie conduit à 96g de CO<sub>2</sub>/kWh). La durée d'exploitation nécessaire indiquée dans la figure 2 pour le scénario 1a serait donc réduite de moitié dans un tel cas.

### 3.5 Réutilisation sur des surfaces ne permettant pas la création de nouveaux sites (scénario 2)

Il est possible qu'à l'avenir, il y ait de plus en plus de surfaces où l'installation d'un nouveau système n'est pas autorisée, souhaitée ou possible. Cela peut par exemple être le cas sur les surfaces suivantes :

- Surfaces sur lesquelles la construction d'une installation PV est prescrite par la loi et sur lesquelles une nouvelle installation est financièrement intéressante, mais ne l'est pas (ombragées, provisoires, etc.).
- Surfaces pour lesquelles le maître d'ouvrage adopte une approche prévoyante en matière de réduction des émissions grises ou privilégie en principe la réutilisation.
- les surfaces des propriétaires qui ne disposent pas du capital nécessaire à la construction d'une nouvelle installation.

Le scénario 2 est le seul scénario qui entraîne une augmentation supplémentaire de la capacité PV. Même sur de telles surfaces, le coût écologique de la réutilisation d'une installation PV doit être proportionnel aux avantages liés à la production d'électricité supplémentaire et à la durée d'exploitation restante. C'est pourquoi il est comparé aux valeurs d'émission habituelles pour l'électricité PV.

Si une installation PV est entièrement déplacée, seules les dépenses de transport doivent être prises en compte. Celles-ci sont compensées, même en cas de réutilisation suite à une exportation vers l'Afrique ou l'Europe de l'Est, après une deuxième durée de vie inférieure à un an (tableau 3). Il convient de noter que ces considérations ne tiennent pas compte des effets d'un manque d'infrastructure de recyclage.

Tableau3 : Deuxième vie nécessaire pour compenser les émissions de transport d'une installation complètement déplacée (utilisation des valeurs de référence en annexe).

| <b>Destination</b>         | <b>Distance de transport</b>           | <b>Transport kg de CO2/kWp*</b> | <b>Transport kUBP/kWp</b> | <b>Compensation du CO2</b> | <b>Compensation UBP</b> |
|----------------------------|--|---------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Suisse                     | 150km Camion                           | 3                               | 5                         | 3 semaines                 | 2 semaines              |
| Est-DE, Sud-IT, CZ, SK, HU | 1'000km Camion                         | 18                              | 34                        | 4,5 mois                   | 3 mois                  |
| SP, UA                     | 2'000km Camion                         | 36                              | 68                        | 9 mois                     | 6 mois                  |
| Afrique de l'Est, GH       | 9'000km par bateau, 1'000km par camion | 24                              | 50                        | 6 mois                     | 4 mois                  |

\* Y compris la sous-construction, l'électronique et l'onduleur. Environ 100kg de matériel / kWp pour des modules d'une puissance de 250Wp.

Si de nouveaux composants sont utilisés pour la construction d'installations réutilisées, ils doivent également être compensés par une durée d'exploitation ou une production d'électricité supplémentaire. L'utilisation d'une nouvelle électronique et d'un nouvel onduleur augmente la durée d'exploitation nécessaire de 5,5 (CO2) et 9 ans (UBP). En comparaison, l'utilisation d'une nouvelle sous-structure ne nécessite que 2 années d'exploitation supplémentaires.

## 4. Conclusion

Dans les circonstances actuelles du marché, la rentabilité de la réutilisation des installations photovoltaïques n'est assurée que dans des conditions très restreintes, notamment en raison du faible prix des modules neufs (situation en janvier 2025). Les modules présentant une durée d'utilisation très courte et une efficacité élevée ou le déplacement d'installations aussi complètes que possible présentent un intérêt pour la réutilisation. Les calculs doivent être effectués au cas par cas en tenant compte des recettes attendues (prix de l'électricité, part de consommation propre) et des éventuels coûts supplémentaires d'une réutilisation (surface nécessaire, coûts de planification). Du point de vue des coûts d'installation, une réutilisation serait particulièrement intéressante pour les grandes installations (300-1'000 kWp), pour lesquelles les modules représentent une part plus importante des coûts totaux. Mais en même temps, en Europe, ce sont surtout les grandes installations qui sont souvent démontées avant la fin de leur vie technique, car le re-powering avec des modules plus efficaces permet ici d'obtenir des rendements plus élevés.<sup>15</sup>

En raison des coûts engendrés par les tests de modules PV d'occasion, il est judicieux de réduire autant que possible le nombre de tests effectués et de renoncer autant que possible aux tests de modules individuels. Ainsi, les modules PV d'occasion peuvent être compétitifs en termes de prix, même par rapport à des alternatives moins chères comme les invendus de stock. Le nombre de tests peut notamment être réduit si des modules PV supplémentaires de même type peuvent être achetés et stockés à moindre coût afin de compenser d'éventuelles défaillances prématurées.

<sup>15</sup> Ariolli, Oviedo Hernandez, and van der Heide, "Re-Use of PV Modules and Circular Business Models".

La réutilisation des installations photovoltaïques n'est pas toujours judicieuse, même du point de vue de la durabilité. Les conditions d'une réutilisation écologique sont toutefois beaucoup moins restrictives que celles d'une considération économique. La priorité devrait être donnée à la réutilisation d'installations photovoltaïques dont tous les composants sont si possible réutilisés. Dans la mesure du possible, il convient de privilégier les sites pour lesquels l'exploitation d'une nouvelle installation PV ne peut pas être considérée comme prioritaire pour toute la durée de vie prévue, ou les sites pour lesquels de nouvelles installations PV ne sont pas une option (extension supplémentaire de la capacité). Mais même sur les sites normaux avec une durée d'exploitation attendue de 30 ans (scénario 1b), l'utilisation d'une installation PV réutilisée est judicieuse sous certaines conditions. Dans le meilleur des cas, il convient de procéder à une évaluation au cas par cas.

Les calculs de Swiss PV Circle montrent que le lieu d'utilisation d'une installation PV réutilisée n'a guère d'importance et que l'exportation est judicieuse sur le plan écologique malgré les distances de transport élevées. Il convient toutefois de noter que l'exportation n'est pas toujours autorisée par la loi (voir livrable 5.2). De même, l'exportation peut entraîner des coûts sociaux importants, car il n'existe pas de systèmes de recyclage établis dans tous les pays pour les modules et l'électronique PV, et le recyclage est donc effectué dans des conditions précaires.<sup>16</sup> Les exportations ne devraient donc être effectuées que vers des pays disposant de systèmes de collecte efficaces pour les modules PV et l'électronique.

La réutilisation est particulièrement judicieuse, tant du point de vue écologique qu'économique, lorsque les installations PV sont aussi complètes que possible (réutilisation des modules, de la sous-structure, de l'onduleur et de l'électronique). Alors que des modules PV de construction identique peuvent être installés à différents endroits, la sous-structure et l'onduleur ainsi que l'électronique sont fortement adaptés au toit et aux particularités de l'installation (par ex. emplacement de la boîte à fusibles, orientation des modules, capacité de l'installation). La réutilisation de ces composants est donc très limitée dans la réalité. Afin d'encourager la réutilisation de ces composants, il convient d'enregistrer en détail les détails de ces composants afin de pouvoir vérifier leur adéquation au cas par cas (voir livrables 1.1 et 1.2).

L'aptitude d'une installation à être réutilisée dépend de nombreux facteurs et informations. Le formulaire "Exigences de documentation pour une transmission des installations PV en vue de leur réutilisation", élaboré dans le cadre du projet Swiss PV Circle, doit permettre de rassembler toutes les informations utiles dans un document central afin de les mettre à la disposition des parties intéressées (voir livrable 2.3). Dans ce document, il est également prévu de fournir des détails sur la sous-structure et les onduleurs.

---

<sup>16</sup> Agyeman et al., "Toward a Circular Economy in Ghana's Renewable Energy Sector"; Cimadomo, "Advancing a Circular Economy for Solar Photovoltaics Exported for Reuse - Analysing the Institutional Feasibility of International Extended Producer Responsibility for EU-West Africa Transboundary Movements."

## Annexe

### Annexe 1 : Hypothèses pour les calculs écologiques

- Les composants réutilisés n'entraînent pas d'émissions résiduelles de la première phase d'utilisation (approche de cut-off). Le recyclage de l'installation photovoltaïque est déjà pris en compte dans la première phase d'utilisation sur la base des données utilisées.
- Le démantèlement d'une installation est indépendant de la réutilisation des composants. Une réutilisation prolonge donc toujours la durée de vie totale des composants de la durée de leur deuxième vie. Sans réutilisation, les composants auraient été recyclés après la première phase d'utilisation.
- Pour tous les facteurs CO<sub>2</sub> et UBP, les données de l'analyse du cycle de vie dans le secteur de la construction ont été utilisées.<sup>17</sup>
- Pour les onduleurs, une durée de vie moyenne de 15 ans a été retenue, avec un remplacement proportionnel des onduleurs en cas de durée de fonctionnement plus longue.<sup>18</sup> Pour tous les autres composants, la durée de vie est illimitée ou correspond à la durée de vie attendue d'une nouvelle installation (30 ans).
- Les valeurs d'émission de seuil de rentabilité utilisées sont 48g CO<sub>2</sub>/kWh et 151 UBP/kWh pour l'énergie moyenne produite par les nouvelles installations PV, tant que la nouvelle installation atteint sa durée de vie totale de 30 ans.
- Tous les calculs ont été effectués sur la base d'une installation Mono-Si sur toiture avec une production d'énergie moyenne de 1'000 kWh/puissance kWp installée par an.
- L'effet du besoin supplémentaire d'électronique et de sous-structure pour les modules réutilisés avec un rendement plus faible et un besoin de surface plus élevé a été pris en compte.

---

<sup>17</sup> "<https://www.kbob.admin.ch/fr/Données> du bilan écologique dans le domaine de la construction."

<sup>18</sup> Tschümperlin et al., "Life Cycle Assessment of Low Power Solar Inverters (2.5 to 20 kW)."

## Littérature

- Agyeman, Eric, David A. Quansah, Augustine Ntiamoah, Lena D. Mensah, and Emmanuel W. Ramde. "Toward a Circular Economy in Ghana's Renewable Energy Sector: A Quantitative Assessment of Waste from Solar Photovoltaic Modules in Ghana." *International Journal of Green Energy*, March 3, 2025, 1–20. <https://doi.org/10.1080/15435075.2025.2469136>.
- Ariolli, Daniela, Guillermo Oviedo Hernandez, and Arvid van der Heide. "Re-Use of PV Modules and Circular Business Models." Trust-PV, August 2023. <https://trust-pv.eu/reports/repair-re-use-and-in-source-recycling-of-pv-modules-and-bos-components/>.
- BAFU. "Ökofaktoren Schweiz 2021 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit." Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2021.
- Bloch, Lionel, and Yannick Sauter. "Photovoltaikmarkt: Preisbeobachtungsstudie 2023." EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie, June 13, 2024.
- Cimadomo, Simone. "Advancing a Circular Economy for Solar Photovoltaics Exported for Reuse - Analysing the Institutional Feasibility of International Extended Producer Responsibility for EU-West Africa Transboundary Movements." Lund: Master thesis - IIIIEE, Lund University, 2024.
- Frischknecht, R, P Stolz, G Heath, M Raugei, P Sinha, and M de Wild-Scholten. "Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020." International Energy Agency, April 2020. [https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA\\_Task12\\_LCA\\_Guidelines.pdf](https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/07/IEA_Task12_LCA_Guidelines.pdf).
- "<https://meyrin.ch/fr/>," n.d.
- "<https://pronovo.ch/en/services/tariff-calculator/>," n.d.
- "<https://re-win.ch/>," n.d.
- "<https://ww2.sig-ge.ch/>," n.d.
- "<https://www.hes-so.ch/en/recherche-innovation/research-projects/detail-projet-recherche/remco-reemplois-des-materiaux-de-construction-etat-des-lieux-sur-les-defis-logistiques/>," n.d.
- "<https://www.kbob.admin.ch/en/oekobilanzdaten-im-baubereich/>," n.d.
- "<https://www.ost.ch/en/research-and-consulting-services/technology/renewable-energies-and-environmental-engineering/spf-institute-for-solar-technology/testing/mobile-pv-test-laboratory/>," n.d.
- "<https://www.solarenergie-kueng.ch/>," n.d.
- Jäggi, Adrian, and Christof Bucher. "Plug & Play-Kennlinienmessgerät für Photovoltaik-Module," 2025.
- Tschümperlin, Laura, Philippe Stolz, Franziska Wyss, and Rolf Frischknecht. "Life Cycle Assessment of Low Power Solar Inverters (2.5 to 20 kW)." Bundesamt für Energie BFE, October 3, 2016.